

ROZKŁAD SIŁ I ICH WPLYW NA PRAWIDŁOWĄ PRACĘ KULKOWYCH ŁOŻYSK SKOŚNYCH

DISTRIBUTION OF FORCES AND THEIR IMPACT ON THE PROPER WORK OF ANGULAR CONTACT BALL BEARINGS

Paweł Turek

Paweł Piórkowski

Politechnika Wrocławska

Wydział Mechaniczny

Katedra Obrabiarek i Technologii Mechanicznych

ul. Łukasiewicza 5

50-371 Wrocław

e-mail: pawel.turek@pwr.edu.pl

Abstract: The paper presents the dependence that exists between the bearing preload, and its maximum speed. It discusses the distribution of forces within the bearing and behavior of the rolling element (ball) with increasing spindle speed. The definitions of slow and fast speed bearings commonly used in the literature are presented. It explained the need for systems with variable preload of angular contact ball bearings especially in systems operating over a wide speed range. Further we described the influence of preload on the bearing life and the influence of centrifugal force on the rigidity and accuracy of the spindle.

Keywords: preload of angular contact bearings, machine tool spindles.

Wprowadzenie

Współczesna obrabiarka kojarzona jest powszechnie z maszyną typu CNC. Do napędu głównego w tego typu maszynach powszechnie wykorzystywane są elektrowrzeciona, których prędkość obrotowa może sięgać nawet kilkudziesięciu tysięcy obr/min przy jednoczesnej eliminacji przekładni i zachowaniu szerokiego zakresu prędkości obrotowych. Stosując elektrowrzeciona można osiągnąć znacznie większą wydajność i dokładność całego procesu obróbki. Ze względu na potrzebę obróbki z bardzo dużymi prędkościami skrawania konstruktorzy napędów głównych zaczęli, głównie we frezarkach i centrach obróbkowych zastępować stosowane dotychczas łożyska walcowe łożyskami skośnymi. Zmiana ta podyktowana została ograniczeniem maksymalnej prędkości obrotowej łożysk walcowych na poziomie 2–3 tys. obr/min. Po jej przekroczeniu obserwowano gwałtowny wzrost strat i bardzo silne nagrzewanie się łożyska walcowego. W przypadku łożysk kulkowych skośnych takie zjawisko występuje również, ale przy prędkościach obrotowych wyższych co najmniej o rząd wielkości. Zmienia się wówczas rozkład sił działających wewnątrz łożyska, co znacząco wpływa na pracę i zachowanie się całego układu wrzecionowego. Przez lata prowadzone były prace, dzięki którym konstrukcje wrzecion stały się bardziej uniwersalne.

Badano wpływ smarowania, wielkości łożysk ich liczby w węzle łożyskowym oraz temperatury pracy wrzeciona [13]. Oddzielnym zagadnieniem poddawanym analizie był również wpływ napięcia wstępnego łożysk skośnych oraz jego zmiany w trakcie pracy wrzeciona. Prowadzono także prace, które miały odpowiedzieć na pytanie w jakim stopniu wartość napięcia wstępnego wpływa na trwałość łożyskowania [14]. Wszystkie te prace miały na celu opracowanie konstrukcji pozwalającej prowadzić obróbkę z możliwie maksymalnymi parametrami skrawania przy zachowaniu wysokiej dokładności i powtarzalności procesu.

Opis zagadnienia - obróbka wysokoobrotowa

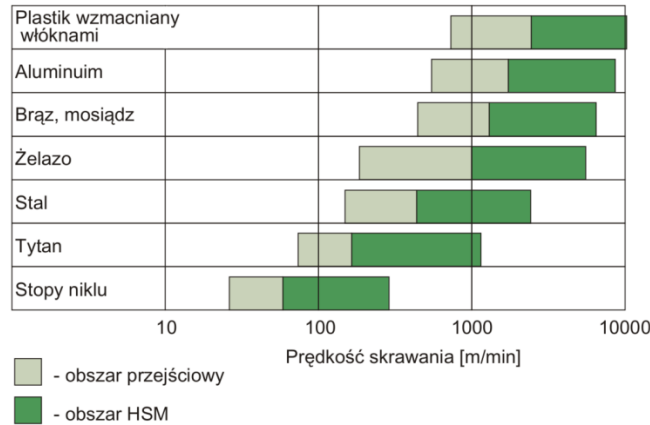
Wraz ze wzrostem wymagań dotyczących dokładności wytwarzanych produktów obrabiarkom i systemom obróbkowym stawia się coraz wyższe wymagania. Kładzie się przede wszystkim nacisk na zwiększanie wydajności przy równoczesnym zwiększaniu dokładności obróbki [2]. Wprowadza się coraz to wyższe prędkości obrotowe wrzecion, a taką obróbkę powszechnie nazywa się jako obróbkę typu HSC (*High Speed Cutting*). Ponieważ obróbka skrawaniem może być prowadzona z bardzo różnymi parametrami i na różnych obrabiarkach powstaje problem jednoznacznego określenia podziału na obróbkę tradycyjną i typu HSC.

Według różnych definicji można o niej mówić w przypadku gdy [3, 4, 12, 15]:

- prędkość wrzeciona przekracza 10000 obr/min.,
- współczynnik $D_m n$ stosowany w przypadku łożysk kulkowych w napędzie głównym przekracza 2000 000,

gdzie D_m – średnia średnica łożyska, n – prędkość obrotowa wrzeciona w obr/min.,

- stosunek mocy napędu do prędkości obrotowej wrzeciona jest mniejszy niż 0,005 KW/(obr/min.),
- prędkość skrawania przekracza umownie przyjętą granicę w zależności od rodzaju materiału (rys. 1).



Rys. 1. Zakres prędkości skrawania - obróbka HSC w przypadku różnych materiałów [4].

Budowa i zasada działania łożysk skośnych

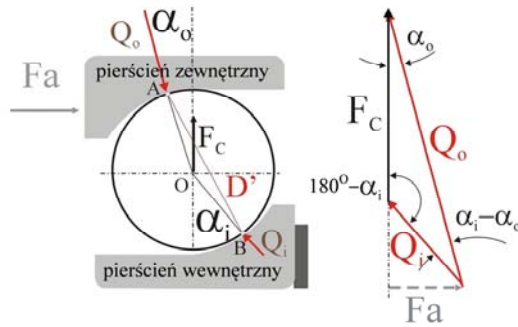
Wrzeciono lub inny dowolny element obrotowy musi być podparty na łożyskach. Ich rodzaj i liczba jest różna w zależności od kierunku i wielkości działających sił. W przypadku rozwiązania z dwoma łożyskami zazwyczaj jedno z nich przenosi siły osiowe (jest łożyskiem ustalającym) natomiast drugie ma możliwość przemieszczania się w oprawie (tzw. łożysko pływające). Takie rozwiązanie nie powoduje wzrostu obciążenia łożysk w kierunku osiowym na skutek rozszerzalności cieplnej wrzeciona. Połączeniem łożysk promieniowych i osiowych są łożyska stożkowe lub skośne, które dzięki swojej budowie potrafią jednocześnie przenosić obciążenia w dwóch kierunkach. Procentowy udział sił przenoszonych w poszczególnych kierunkach (promieniowym i osiowym) jest ściśle uzależniony od kąta działania łożyska skośnego, a jego prawidłowa praca zależy od właściwego napięcia podczas pracy.

Elektrowrzeciona wyposażane są w większości przypadków w łożyska skośne, w których element toczny jest kulką, a nominalny kąt działania łożyska α mieści się w przedziale $15-40^\circ$. Kąt ten jest mierzony od prostej prostopadłej do osi łożyska w kierunku działania obciążenia. Im większa wartość tego kąta tym łożysko posiada zdolność do przenoszenia większych sił w kierunku osiowym przy jednoczesnym spadku sztywności wrzeciona w kierunku promieniowym.

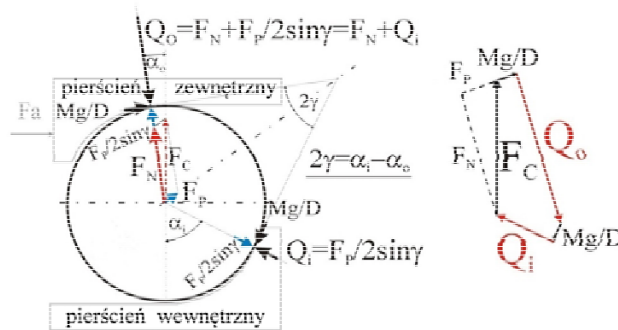
W łożyskach skośnych zamontowanych we wrzecionie i napiętych wstępnie kąt działania w czasie spoczynku wynosi α . Po włączeniu obrotów wrzeciona następuje przemieszczenie kulek względem pierścieni i niewielka zmiana kąta działania łożyska głównie na bieżni zewnętrznej. Kąt ten ulega zmianie i przyjmuje wartość α' . Pojawia się siła odśrodkowa działająca na kulkę,

która powoduje zmianę rozkładu obciążeń w łożysku. Z tego względu, aby utrzymać zadany kąt działania łożysko skośne musi być napięte siłą, która będzie przeciwdziałać sile odśrodkowej. Występują również układy, w których stosuje się różnego rodzaju aktywne metody napinania łożysk. Dzięki nim zapewniona zostaje regulacja napięcia wstępnego również podczas pracy wrzeciona. Ta zmiana kąta działania występuje jedynie w wąskim zakresie poprzez oddziaływanie siłą osiową na bieżnię wewnętrzną i zewnętrzną łożyska, skutkiem czego jest ich wzajemne przemieszczanie. Tego typu wrzeciona cechują większą uniwersalnością oraz posiadają szersze możliwości ich zastosowania do różnych rodzajów obrabiarek.

Ze względu na rozkład sił występujących w łożyskach skośnych należy rozróżnić łożyska nisko ($D_m n < 10^6$) i wysokoobrotowe ($D_m n > 10^6$) [8], gdzie: D_m – średnia średnica łożyska [mm], n – prędkość obrotowa łożyska [obr/min]. W przypadku tych pierwszych równowaga sił sprowadzona jest do układu trzech sił przecinających się w jednym punkcie. Są to siła odśrodkowa F_c oraz siły Q_o i Q_i , które równoważą działanie siły odśrodkowej (rys. 2). Na skutek małej prędkości obrotowej moment żyroskopowy ma pomijalnie mały wpływ na zachowanie się kulki i rozkład sił w łożysku. Należy go jednak uwzględnić w przypadku łożysk wysokoobrotowych, kiedy znacznemu wzrostowi ulega siła odśrodkowa F_c . Rozkład sił dla łożysk wysokoobrotowych, który uwzględnia moment żyroskopowy przedstawiono na rys. 3, gdzie dla wyznaczenia wartości Q_o i Q_i siłę F_c rozłożono na dwie składowe w kierunku stycznym F_p i normalnym F_n . Różnice kątów α_o i α_i powstają na skutek wprowadzenia napięcia wstępnego łożyska poprzez siłę F_a .



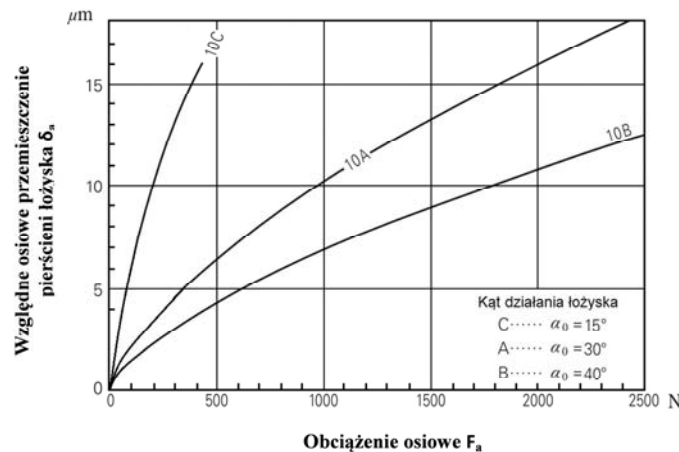
Rys. 2. Rozkład sił w łożysku skośnym niskoobrotowym [8]: F_c – siła odśrodkowa, F_a – siła osiowa napinająca łożysko, F_N – składowa siły odśrodkowej w kierunku normalna, F_p – składowa siły odśrodkowej w kierunku wyznaczonym przez styczne kulki z bieżniami, Q_o – siła nacisku bieżni zewnętrznej na kulkę, Q_i – siła nacisku bieżni wewnętrznej na kulkę, Mg – moment żyroskopowy, D – średnica kulki, D' – cięciwa, na której rozpięte są punkty podparcia kulki, α_o – kąt dla styku kulki z pierścieniem bieżni zewnętrznym, α_i – kąt dla styku kulki z pierścieniem wewnętrznym.



Rys. 3. Rozkład sił w łożysku skośnym wysokoobrotowym [8]: F_c – siła odśrodkowa, F_a – siła osiowa napinająca łożysko, F_N – składowa siły odśrodkowej w kierunku normalna, F_p – składowa siły odśrodkowej w kierunku wyznaczonym przez styczne kulki z bieżniami, Q_o – siła nacisku bieżni zewnętrznej na kulkę, Q_i – siła nacisku bieżni wewnętrznej na kulkę, Mg – moment żyroskopowy, D – średnica kulki, D' – cięciwa, na której rozpięte są punkty podparcia kulki, α_o – kąt dla styku kulki z pierścieniem bieżni zewnętrznym, α_i – kąt dla styku kulki z pierścieniem wewnętrznym.

Na rys. 4 przedstawiono zależność względnego przesuńnięcia osiowego bieżni łożyska skośnego w funkcji obciążenia osiowego. Zestawiono ze sobą trzy łożyska o tej samej średnicy wewnętrznej, ale o różnym kącie

działania. Można zaobserwować, że im większy nominalny kąt działania łożyska tym dla tej samej wartości luzu ujemnego bieżni łożysko może przenosić większe obciążenia w kierunku osiowym.



Rys. 4. Zależność względnego osiowego przemieszczania się pierścieni łożyska skośnego od obciążenia osiowego dla łożysk o różnych nominalnych kątach działania [17].

Zakłada się, że nominalny kąt działania łożyska skośnego uzyskuje się po wprowadzeniu właściwego napięcia wstępnego, które często nazywane jest luzem ujemnym. Podczas montażu układu wrzecionowego na bieźnie łożyska wywierany jest nacisk o określonej wartości siły, różnej dla danego typu i zastosowania łożyska. Zapewnia to dokładne i ściśle przyleganie bieźni do elementu tocznego, skasowanie luzów oraz przyczynia się do prawidłowego i równomiernego obciążenia części tocznych. Wyeliminowane zostają wzajemne poślizgi, a między kulkami i bieźniami występuje głównie tarcie toczne. To napięcie wstępne jest jedną z istotnych dynamicznych cech konstrukcyjnych (DCK) [2] układu wrzecionowego z łożyskami skośnymi. Powoduje ono wzrost sztywności, ale równocześnie ma znaczący wpływ na wzrost oporów ruchu w łożyskach. Napięcie wstępne powoduje dodatkowe obciążenia elementów tocznych, w wyniku których zwiększa się moment tarcia i starty mocy [10, 11]. Dzieje się tak na skutek większego tarcia, jakie powstaje szczególnie w fazie rozruchu. Z drugiej jednak strony praca łożysk w stanie nienapiętym nie jest możliwa ze względu na brak możliwości przenoszenia obciążeń. Napięcie wstępne wpływa na sumaryczne opory ruchu wyrażone jako moment tarcia (M_t). Opory ruchu łożyska można wyrazić sumą trzech składowych:

$$M_t = M_1 + M_2 + M_3 \quad (1)$$

gdzie:

M_1 – składowa momentu wynikająca z obciążenia zewnętrznego,

M_2 – składowa momentu wynikająca z obecności czynnika smarującego,

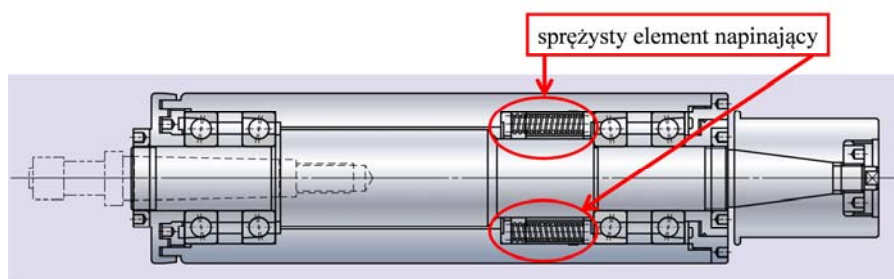
M_3 – składowa momentu powstająca na skutek działania sił wewnętrznych.

Wraz ze wzrostem napięcia wstępnego zmniejsza się udział tarcia ślizgowego między kulkami, a bieźniami łożyska, co bezpośrednio wpływa na mniejsze opory ruchu [16].

Wprowadzenie ujemnego luzu w łożysku powoduje zwiększenie jego sztywności, co skutkuje zmniejszeniem amplitudy drgań i większą dokładnością ruchu wrzeciona. Powoduje też zmniejszenie hałasu, ale jest korzystne tylko do pewnej optymalnej wartości napięcia wstępnego, po przekroczeniu której następuje wzrost oporów ruchu w łożysku. Doświadczalnie wykazano, że jest to spowodowane początkowym spadkiem lepkości środków smarujących na skutek podnoszenia się ich temperatury, co wiąże się ze zmniejszeniem składowej momentu tarcia M_2 . Po osiągnięciu zadanego napięcia wstępnego ekstremum, które zawsze występuje w obszarze nominalnego kąta działania łożyska, mimo dalszego spadku lepkości tych środków następuje gwałtowny wzrost obciążenia wynikający z nadmiernego napięcia łożyska i wzrostu sił reakcji między elementami tocznym, a bieźniami łożyskowymi. W konsekwencji następuje wzrost składowej momentu tarcia M_1 i jest on większy niż zmniejszenie się składowej M_2 . Powoduje to wzrost sumarycznych oporów ruchu wyrażonych momentem tarcia M_t , co może prowadzić do przzerwiania filmu smarnego i znacznego skrócenia czasu bezawaryjnej pracy łożyska [2, 9, 17]. To niekorzystne zjawisko nasila się, gdy wrzeciono obraca się z wysokimi prędkościami obrotowymi. Rośnie wówczas siła odśrodkowa, a wraz z nią siły wewnętrzne wyrażone składową momentu tarcia M_3 i następuje dalszy wzrost sumarycznych oporów ruchu M_t . Z tego względu przy układach pracujących z dużą prędkością obrotową konieczne jest stosowanie małych napięć wstępnych, przez co wrzeciona cechują się zmniejszoną sztywnością.

Wpływ napięcia wstępnego na pracę łożysk

Elementy sprężyste wykorzystywane do wywierania stałego napięcia wstępnego łożysk skośnych stosuje się w układach łożyskowych, gdzie jeden zespół łożysk jest ustalającym, a drugi pływającym. Schemat takiego wrzeciona przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Wrzeciono ze sprężystym elementem utrzymującym stałe napięcie wstępne [17].

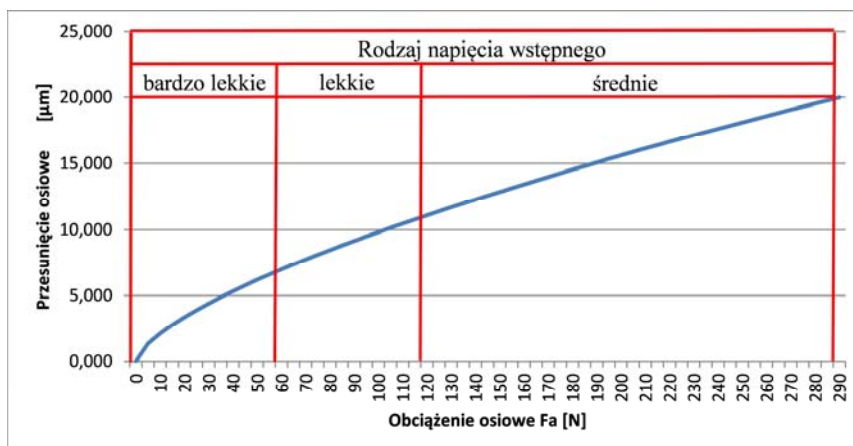
W tym układzie sprężyna ma za zadanie utrzymać stałe napięcie wstępne. Jednak jak wykazano w licznych badaniach [1, 2, 6, 7], nie spełnia ona swoich funkcji głównie w przypadku wrzecion wysokoobrotowych. Wraz ze wzrostem prędkości obrotowej wrzeciona następuje silny wzrost siły odśrodkowej. Powoduje to

wzrost nacisków elementów tocznych na zewnętrzne bieźnie łożyskowe. Równocześnie zmniejszeniu ulega kąt działania takiego łożyska. Skutkuje to znacznym spadkiem sztywności układu wrzecionowego w kierunku osiowym. Problemem jest też powtarzalność ruchów, jaką może zapewnić sprężyna. Problem ten nasila się w

przypadku łożysk o małych gabarytach, w których niewielka zmiana sztywności elementu sprężystego i siły jaką on wywiera na łożyska powoduje zmianę napięcia wstępnego łożyska z bardzo lekkiego na lekkie lub nawet średnie. Przykładem może być wykres napięcia wstępnego dla łożyska skośnego 7206C w którym nominalny kąt działania wynosi 15° (rys. 6). Względne przemieszczenie się bieżni łożyska zaledwie o $20\ \mu\text{m}$ powoduje zmianę osiowego obciążenia o 290 N. Skutkiem tego jest działanie łożyska w zupełnie innych warunkach pracy niż założone w projekcie przez konstruktora.

Elementy toczne w silniej napiętym łożysku muszą pokonywać większe opory ruchu, przez co szybciej się nagrzewają, a całe łożysko cechują wyższe straty mocy. Równocześnie zmieniają się częstotliwości rezonansowe takiego elektrowrzeciona, co może powodować jego pracę w zakresie prędkości obrotowych, przy których na skutek zmiany sztywności wrzeciona wystę-

pują drgania rezonansowe. Przesunięcie częstotliwości rezonansowych na skutek zmiany sztywności jest też niekorzystne szczególnie w przypadku pracy ze zmiennymi prędkościami w szerokim zakresie obrotów. Zakres częstotliwości wymuszeń kinematycznych związanych z obrotami wrzeciona może pokrywać się z częstotliwościami rezonansowymi układu i powodować wzbudzenie się drgań wrzeciona. Te drgania mają niekorzystny wpływ bezpośrednio na łożyska [5], a w konsekwencji na dokładność obrabiarki. Mogą być też przenoszone np. przez posadzkę lub strop na wszystkie pozostałe maszyny pracujące na danej hali. Dla układów wrzecionowych z elementem sprężystym należy uwzględnić zmienną sztywność układu łożysk i projektować je tak, aby wyeliminować prawdopodobieństwo pracy w pobliżu częstotliwości drgań rezonansowych, ponieważ częstotliwość tych drgań jest ściśle związana z napięciem łożysk danego układu wrzecionowego [18].



Rys. 6. Wykres zależności przesunięcia osiowego od obciążenia osiowego dla łożyska 7206C [17].

Innym ograniczeniem, które nasila się wraz ze wzrostem napięcia wstępnego jest spadek maksymalnej dopuszczalnej prędkości obrotowej łożyska. Producenci łożysk podają przykładowe tabele, jak np. Tabela 1, na podstawie których można określić jaka powinna być maksymalna prędkość danego układu łożysk. W kolumnie „układ łożysk” schematycznie przedstawione zostały możliwe do stosowania układy łożyskowe (DB – pojedyncze łożyska, DBB – łożyska podwójne, DBD – z jednej strony dwa, a z drugiej jedno łożysko). W

kolejnych kolumnach przedstawione zostały poszczególne zakresy napięcia łożyska (EL – bardzo lekkie, L – lekkie, M – średnie, H – wysokie) oraz współczynniki korekcyjne maksymalnej prędkości obrotowej dla danego typu łożyska. Jeśli weźmiemy pod uwagę wspomniane wcześniej łożysko 7206C firmy NSK i zmianę sztywności z odmiany bardzo lekkiej na średnią otrzymujemy spadek maksymalnej wartości prędkości obrotowej o ponad 20%.

Tabela 1. Współczynniki korekcyjne maksymalnej prędkości obrotowej łożysk skośnych w zależności od napięcia wstępnego i układu pracy łożysk [17].

Układ łożysk		Zakres napięcia łożysk			
		EL – bardzo lekkie	L – lekkie	M – średnie	H – wysokie
DB	⊗ ⊗	0,85	0,80	0,65	0,55
DBB	⊗ ⊗ ⊗ ⊗	0,80	0,75	0,60	0,45
DBD	⊗ ⊗ ⊗	0,75	0,70	0,55	0,40

Podsumowanie

Przedstawione w artykule zależności siły odśrodkowej i prędkości obrotowej pokazują, że dla prawidłowego funkcjonowania układu wrzecionowego w szerokim zakresie prędkości obrotowych konieczne jest stosowanie układów, w których napięcie wstępne łożysk będzie korygowane w trakcie pracy wrzeciona. Zastosowanie wyłącznie elementu sprężystego pozwala na uzyskanie dużej sztywności dla małych i małej sztywności dla wysokich prędkości obrotowych. Duże napięcie wstępne przy wzroście prędkości obrotowej będzie powodowało silne nagrzewanie się łożysk. Równocześnie rosnąca siła odśrodkowa będzie powodowała wzrost oporów ruchu, zwiększone tarcie i przyspieszone zużycie łożyska. Nie bez znaczenia pozostaje również wybór rodzaju smarowania oraz układ pracy łożysk, który jednoznacznie ogranicza prędkość obrotową zespołu wrzecionowego, a tym samym zakres zastosowań i uniwersalność konstrukcji. Przedstawione w artykule zależności zostały oparte na danych katalogowych dotyczących łożysk precyzyjnych z kulkami stalowymi dedykowanych do pracy w układach wrzecionowych.

Sprostanie zmiennym warunkom pracy układu wrzecionowego oraz wymaganiom dotyczącym precyzji i dokładności prowadzonej obróbki skrawaniem, która coraz częściej wynosi poniżej 1 μm nie jest łatwe. Z tego

względem konstruktorzy coraz częściej proponują stosowanie aktywnych metod regulacji napięcia wstępnego łożysk. Pozwalają one na zmianę i korektę siły napinającej łożyska, a tym samym dają możliwość pracy układu wrzecionowego z różną sztywnością w zależności od wymaganych warunków pracy. Warto tutaj wspomnieć o metodach napinania łożysk przy zastosowaniu pola magnetycznego lub układach wykorzystujących do tego celu siłowniki piezoelektryczne. Jednak należy pamiętać, że przy budowie takiego układu należy uwzględnić wpływ wszystkich istotnych czynników (np. zakres maksymalnego przemieszczenia aktuatora, ich liczbę, wartość siły osiowej jaką generują, rodzaj sterowania) oraz należy zbudować układ, który będzie stabilny pod względem rozkładu obciążeń na poszczególne łożyska. Należy także pamiętać, że metoda ta wymaga dodatkowego układu sterowania, który będzie współpracował z elektrowrzecionem oraz mierzył i na bieżąco korygował napięcie łożyska. Takie rozwiązanie może dać wiele korzyści płynących głównie z możliwości chwilowego zwiększania bądź zmniejszania sztywności wrzeciona, odstrajania go od częstotliwości rezonansowych oraz zmniejszania zużycia łożysk. Problemem są koszty, jakie związane są z realizacją takiego aktywnego układu, a także to, że zmiana częstotliwości drgań rezonansowych uzależniona jest nie tylko od zmiany sztywności łożysk, ale również od czasu reakcji układu na pojawiające się drgania rezonansowe.

Literatura

1. Chen, J.S., Chen, K.W., Bearing load analysis and control of a motorized high speed spindle, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2005, 45, pp. 1487–1493.
2. Dietrych, J., System i konstrukcja, Warszawa, WNT, 1985.
3. Elebestawi, M.A., High Speed Machining – Definition, Requirement and Evaluation, *International Journal of Mechanical Production System Engineering*, 2003, IV, pp. 1-3.
4. Fidler, U., Sahm, A., On the Cutting Edge of High Speed Machining, 9th International Scientific Conference on Production Engineering, Computer Integrated Manufacturing and High Speed Machining – Lumbarda, Korcula, Croatia, 2003.
5. Gunduz, A., Dreyer, J.T., Singh, R., Effect of bearing preloads on the modal characteristics of a shaft-bearing assembly: Experiments on double row angular contact ball bearings, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2012, 31, pp. 176–195.
6. Hagi, G., Dragan, B., Feed-back preload systems for high speed rolling bearings assemblies, *The Annals of University Dunarea De Jos of Galati Fascicle*, 2004, VIII, pp. 43–47.
7. Hwang, Y.K., Lee, Ch.M., Development of automatic variable preload device for spindle bearing by using centrifugal force, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2009, 49, pp. 781–787.
8. Jędrzejewski, J., Kwaśny, W., Modelling of angular contact ball bearings and axial displacements for high-speed spindles, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2010, 59, pp. 377–382.
9. Khonsari, M.M., Booser, E.R., *Applied Tribology. Bearing Design and Lubrication*, Wiley, New York, 2008.
10. Krzemiński-Freda, H., Sztywność łożysk skośnych i ich układów, *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn*, 1986, 3–4, s. 223-232.
11. Kwaśny, W., Straucholt, S., Obliczenia strat mocy w kulkowych łożyskach tocznych z uwzględnieniem obciążeń złożonych, *Prace naukowe ITBM*, Wrocław, 1985.
12. Makina Inc. Inside Boeing's Phantom Works – Exploring Issues of High – Speed Machining and Metal Cutting Dynamics, *Radical Departures – Advanced Techniques in Aerospace Manufacturing*, 2001.
13. Potrykus, J., Energooszczędne smarowanie wysokoobrotowych łożysk tocznych, Materiały konferencyjne „Postęp w rozwoju łożysk tocznych – ISKRA 100”, Politechnika Świętokrzyska, Kielce, 1996, s. 251-264.
14. Raczyński, A., Kaczor, J., Wpływ zacisku wstępnego łożysk kulkowych skośnych na trwałość łożyskowania, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Transport*, 2014, z. 83, s. 191-203.

15. Schulz, H., The history of High Speed Machining, *Revista De Ciência & Tecnologia*, 1999, vol. 13, pp. 9-18.
16. Styp-Rekowski, M., Some constructional features versus exploitational properties of special rolling bearings, *Proceedings of the Japan International Tribology Conference*, Japan, Nagoya, 1990, 2, pp. 767-772.
17. Super Precision Bearings. Łożyska Superprecyzyjne, Motion&Control NSK
18. Waczyński, S., Łożyskowanie wałka z zastosowaniem skośnych łożysk tocznych oraz elementu sprężystego, *Problemy niekonwencjonalnych układów łożyskowych*, Zbiór Prac Konferencyjnych pod redakcją J. Burcana, Łódź, 1995, s. 71-74.